



**Universidad Autónoma Metropolitana**  
**Unidad Azcapotzalco**

---

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

EVALUACIÓN DEL ANÁLISIS DINÁMICO INCREMENTAL  
MEDIANTE MODELOS DE ATENUACIÓN

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
**MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**  
P R E S E N T A

**MARIO ALBERTO CARRASCO LIZARRAGA**

DIRECTOR DE TESIS: **DR. DANNY ARROYO ESPINOZA**

MÉXICO, D. F.

DICIEMBRE DE 2017

## INDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN.....	3
1.1	Antecedentes .....	3
1.2	¿Por qué el estudio? .....	4
1.3	Objetivo.....	5
1.4	Metodología.....	5
1.5	Alcances .....	6
1.6	Organización de la Tesis.....	6
2	ANÁLISIS DINÁMICO INCREMENTAL.....	7
2.1	¿En qué consiste?.....	7
2.2	Análisis dinámico incremental con varios registros.....	9
2.3	Escalamiento lineal .....	10
3	BASE DE DATOS.....	12
3.1	Acelerogramas .....	12
3.2	Cociente espectral.....	14
4	CALCULOS REALIZADOS .....	17
4.1	Introducción .....	17
4.2	Curva de capacidad mediante ADI.....	18
4.3	Curva de capacidad mediante ADBS.....	18
4.4	Peligro sísmico mediante ADI .....	21
4.5	Peligro sísmico mediante Análisis Dinámicos Basados en Sismología (ADBS).....	23
4.6	Incertidumbre epistémica y el uso de diferentes modelos de atenuación. ....	25
4.7	Definición de parámetro que limita la aplicabilidad del ADI .....	27
5	RESULTADOS .....	28
6	CONCLUSIONES.....	29
7	REFERENCIAS.....	31

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Espectros de Fourier para Magnitudes $M_w=5$ y $M_w=7$ .	11
Figura 2.2 Cociente de amplitudes entre los espectros de Fourier de la Figura 2.1.	11
Figura 3.1 Coeficiente espectral promedio de los 50 acelerogramas seleccionados.	16
Figura 4.1 ADI multiregistro para un oscilador de un grado de libertad con $T=0.1s$ y $Cy=0.05g$ , se presentan los resultados para los 50 registros seleccionados en gris, en negrita se resalta la mediana de los resultados, así como la misma con $\pm$ una desviación estándar.	19
Figura 4.2 Relación $R$ vs Ductilidad para un $T=0.1s$ y un $cy=0.05g$ . considerando una no linealidad del oscilador y la metodología del ADBS.	20
Figura 4.3 Tasa de excedencia de desplazamiento elástico mediante modelo de atenuación de Boore y Atkinson (2008) y un periodo $T=0.1s$ , conforme a la ecuación 4.2.	22
Figura 4.4 Tasa de excedencia de ductilidad usando la mediana del ADI para un periodo $T=0.1s$ , conforme a la ecuación 4.1.	23
Figura 4.5 Comparativa de curvas de peligro sísmico obtenidas mediante un	24
Figura 4.6 Factores de peso para obtener una medida de respuesta para obtener curva de peligro sísmico para el Oeste de los Estados Unidos según la Encuesta Geológica de los Estados Unidos (United States Geology Survey, USGS, 2008).	26
Figura 4.7 Tasa compuesta de peligro sísmico para tomar en cuenta la incertidumbre epistémica tomando los 3 modelos de atenuación elástica usados en la tesis. Ejemplo considerado para un $T=2.0s$ .	26
Figura 4.8 Comparativa entre curva de capacidad obtenida mediante ADI y ADBS, donde se introduce el valor $R_{LIM}=1.46$ , para un periodo de $T=0.1s$ .	27

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 *Antecedentes*

El crecimiento de la tecnología y su gran poder de procesamiento han hecho posible el continuo crecimiento para lograr métodos de análisis no solo más precisos, sino más complejos. Esta tecnología ha logrado pasar de un método de análisis estático lineal, a uno dinámico lineal, luego análisis estático no lineal, para por último pasar a un análisis dinámico no lineal.

La medida de intensidad se ha convertido en una opción muy popular para estimar la tasa de excedencia de los parámetros de demanda para sistemas con comportamiento inelástico. Para encontrar la relación entre el parámetro de demanda y la medida de intensidad se usa el Análisis Dinámico Incremental ("ADI") que la define de una manera estadística. El ADI se ha convertido en una herramienta importante para encontrar demandas sísmicas inelásticas dentro del marco del Diseño por Desempeño, demostrado por diversos estudios realizados por Vamvatsikos y Cornell (2002, 2004 y 2005).

En la actualidad se tienen muy pocos registros de sismos de magnitudes grandes con los que se puedan hacer estudios sobre la respuesta de las estructuras ante demandas importantes, es por eso que el ADI es una opción ampliamente utilizada, ya que consiste en generar una serie de análisis dinámicos no lineales, considerando un escalado lineal de los movimientos del terreno para con eso simular registros con un rango de magnitudes altas, obteniendo así demandas inelásticas en las estructuras.

## ***1.2 ¿Por qué el estudio?***

Aunque el uso del ADI para estimar demandas sísmicas ha sido exitosamente estudiado, aún existen algunos temas que necesitan ser mejor entendidos. El tema que se ha elegido revisar en este trabajo es la validez que tiene el escalamiento lineal de los acelerogramas para encontrar valores mayores de demanda y así poder completar la curva de capacidad de una estructura. Estudios han tratado el tema del escalamiento lineal (Iervolino y Cornell, 2005; Baker y Cornell, 2005; Tothong y Cornell, 2006a y 2006b).

El escalamiento lineal de los acelerogramas no toma en cuenta los cambios de las características de los movimientos del suelo que están en función de las mismas características del evento sísmico, La influencia de la Magnitud ( $M_w$ ) y de la distancia de los registros a los epicentros ( $R$ ) en el escalamiento de los registros se ha estudiado bastante dentro del campo sismológico, donde se han desarrollado varios métodos de escalamiento consistentes con una base sismológica (Hartzell 1978, Hadley y Helmberger 1980, Boore 1983, Irikura y Kamae 1994, Joyner y Boore 1986, Boatwright 1988, Somerville et al. 1991, Kanamori et al. 1993, Zeng et al. 1993, Ordaz et al. 1995, Beresnev y Atkinson 1997, Kohrs-Sansorny et al. 2005).

A pesar del esfuerzo invertido en el campo de la sismología para escalar registros del movimiento de suelo para obtener acelerogramas físicamente consistentes, esto no se ha tomado en consideración dentro del formato del ADI, y actualmente es difícil de calificar la pertinencia de usar el método de escalamiento lineal cuando se llega a factores de escalamiento muy grandes.

Actualmente se está buscando la aplicación del ADI en México (e. g. Arroyo et. al.), y se ha observado que se ha necesitado usar factores de escalamiento muy grandes para poder encontrar parámetros de demanda mayores, lo cual, con lo dicho anteriormente sobre el escalamiento lineal que este método utiliza, se busca que los resultados presentados proveerán un mejor entendimiento de la aplicabilidad del ADI, identificando situaciones en donde un análisis más sofisticado sería necesario.

### **1.3 Objetivo**

El objetivo de este trabajo es:

"Cuantificar la exactitud del Análisis Dinámico Incremental para estimar tasas de excedencia de desplazamiento de sistemas inelásticos".

### **1.4 Metodología**

En un intento de poder encontrar con certeza la exactitud del ADI, se obtienen curvas de peligro sísmico utilizando las respuestas que se determinan por medio del ADI, para poderlas comparar con curvas de peligro sísmico alternas obtenidas analíticamente con modelos de atenuación y una base sismológica estudiada y justificada.

Para esto se recopilan los registros sísmicos que se utilizaron para hacer los ADI; estos registros son reales sin escalar y fueron obtenidos de la base de datos del Pacific Earthquake Engineering Research (PEER). Todos los registros que se utilizaran son de California, Estados Unidos, ya que el modelo de atenuación inelástica que se usó fue creado usando las características de suelo y de falla de esa zona.

Con el modelo de atenuación inelástica de Tothong y Cornell (TC-02) se obtienen las demandas de desplazamiento inelástico como función de la magnitud ( $M_w$ ) y la distancia epicentral ( $R_{CLD}$ ) que sirvieron para el cálculo de las curvas de peligro sísmico analíticas. Se hizo un análisis probabilístico con el que usando la ley de Gutenberg-Richter y el modelo de atenuación inelástico se encontraran las tasas de excedencia para el parámetro de respuesta elegido.

Finalmente se comparan las diferentes curvas de peligro para diferentes periodos de un sistema idealizado de un grado de libertad para ver los resultados y poder encontrar las posibles limitaciones del uso del ADI.

Aunque una aplicación práctica de un análisis dinámico basado en la sismología (ADBS) puede estar limitada por el gran esfuerzo numérico realizado, este tipo de análisis se utilizó para estudiar las limitaciones e intervalo de aplicabilidad del ADI estándar.

## **1.5 Alcances**

En este trabajo se presentan resultados obtenidos de la respuesta dinámica de un sistema de un grado de libertad (SUGL) con un comportamiento histerético bilineal con un 5% de rigidez post-fluencia. Se utilizó este modelo histerético para ser consistentes con el modelo de atenuación de respuestas inelásticas que se utiliza. Se utiliza un SUGL para facilitar en un principio el análisis de los resultados, ya que si se introducen múltiples grados de libertad (SMGL) se abren mucho más parámetros que se tendrían que revisar y que para efectos de esta tesis no es necesario. A su vez, se piensa que realizando el estudio con SUGL se pueden obtener resultados confiables para después, si se cree necesario, se continúe realizando análisis con un SMGL.

## **1.6 Organización de la Tesis**

En este primer capítulo se introduce el tema a estudiar, se comenta brevemente el uso actual del ADI y la duda existente sobre el escalamiento de acelerogramas con factores de escala elevados, así como de las consideraciones hechas para su revisión. En el capítulo 2 se hace una descripción más detallada del ADI, las premisas que sustentan la herramienta, como se realiza y para que se utiliza en la actualidad. En el capítulo 3 se presentaran las características de la base de datos que se utilizó en el ADI. En el capítulo 4 se presentan los procedimientos numéricos realizados, tanto para pasar del ADI a la curva de peligro sísmico, como la manera de obtener la curva de peligro sísmico con el análisis basado en los modelos de atenuación. En el capítulo 5 se presentan todos los resultados obtenidos de los análisis, y las comparaciones para diferentes periodos de las curvas de peligro sísmico obtenidas por ambos métodos. Por último, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones de este trabajo y las recomendaciones que se encontraron para resolver el objetivo de esta tesis.

## 2 ANÁLISIS DINÁMICO INCREMENTAL

### 2.1 *¿En qué consiste?*

El ADI es un método de análisis paramétrico que se usa para estimar el comportamiento estructural ante cargas sísmicas. El método toma un modelo estructural y lo sujeta a uno o varios registros de movimiento de suelo, escalados a múltiples niveles de intensidad, produciendo una o varias curvas de respuesta de demanda contra nivel de intensidad (Vamvatsikos y Cornell 2002).

Este método ha sido tomado en el marco de trabajo de la ingeniería sísmica basada en desempeño (Performance-Based Earthquake Engineering, PBEE) para estimar la demanda y capacidad de las estructuras. A su vez, la agencia federal para la administración de emergencias (Federal Emergency Management Agency, FEMA) de los Estados Unidos lo ha establecido como el método a utilizar para determinar la capacidad de colapso de una estructura.

El estudio del ADI ahora es un método multipropósito y con una variedad amplia de aplicación, sus objetivos principales son:

- Entendimiento a fondo del rango de respuesta o demanda contra los potenciales niveles de movimiento de suelo.
- Mejor entendimiento de la respuesta estructural de registros sísmicos más intensos y severos.
- Mejor entendimiento de los cambios en la naturaleza de la respuesta de una estructura conforme la intensidad de los registros se incrementa.
- Estimar la capacidad dinámica del sistema global de una estructura.

Antes de dar una explicación más detallada de cómo se realiza un ADI, se presentan descripciones de los términos más importantes que se usan en este método de acuerdo con Vamvatsikos y Cornell (2002):



- ❖ **Factor de escala:** el factor de escala de un acelerograma se define como un valor escalar positivo (+ x) que al ser multiplicado a un valor de aceleración de un registro natural ( $a_1$ ) produce un nuevo valor factorizado:  $ax = a_1 * x$ . Este factor de escala será utilizado para escalar todos los valores del registro tiempo-aceleración, produciendo un vector de aceleraciones "escalado o factorizado por x". Aunque el factor de escala sea la manera más simple de caracterizar una imagen escalada de un acelerograma, no es la manera más conveniente en términos ingenieriles, ya que no ofrece información del poder real que tuviera un sismo con una magnitud mayor sobre una misma estructura. Una manera más consistente de hacer el escalamiento, sería obtener un vector de factores de escala en función de la frecuencia para estimar una relación más real del potencial de daño de una estructura.
  
- ❖ **Medida de intensidad:** esta medida consiste en el valor con el que se va a ir tomando en cuenta la intensidad que un registro sísmico produce en la estructura. Esta medida de intensidad debe ser escalable para ser considerada en el ADI, ya que, si no es una medida escalable, no se podrán encontrar las respuestas de la estructura a mayores intensidades. Entre las medidas de intensidad que más se utilizan están: aceleración máxima de suelo (Peak Ground Acceleration, PGA), velocidad máxima de suelo (Peak Ground Velocity, PGV), pseudo-aceleración espectral del primer modo de vibrar con un 5% de amortiguamiento ( $Sa(T_1, 5\%)$ ), etc. Para este trabajo se utilizó como medida de intensidad el factor de reducción de resistencia (R), el cual indica la relación que existe entre el cortante basal requerido para obtener un desplazamiento pasando la fluencia global de la estructura ( $V_u$ ) y el Cortante Basal registrado para llegar al desplazamiento de fluencia de la misma ( $V_y$ ):  $R = \frac{V_u}{V_y}$ .

- ❖ **Medida de daño:** esta medida es la que nos ayuda a monitorear la respuesta de un modelo estructural dado un nivel de intensidad. Entre los ejemplos más usados de medidas de daño están: cortante basal, distorsión de entrepiso, desplazamiento de azotea, rotación de entrepiso, etc. En este trabajo se utilizó como medida de daño a la ductilidad global del sistema ( $\mu$ ), que se entiende como el desplazamiento inelástico último que presenta una estructura ( $\Delta u$ ) entre el desplazamiento de fluencia de la misma estructura ( $\Delta y$ ):  $\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y}$ .

De una manera resumida, lo que se pretenda lograr con el ADI es desarrollar una serie de análisis dinámicos no lineales, bajo diferentes imágenes de un acelerograma escalado, donde la medida de intensidad se selecciona para poder envolver todo intervalo de la medida de daño (en este caso ductilidad), respuesta que irá desde el comportamiento elástico, pasando por el inelástico hasta llegar al colapso de la estructura.

## ***2.2 Análisis dinámico incremental con varios registros***

Como debiera ser evidente, un estudio ADI con un solo registro sísmico no puede capturar todo el intervalo de comportamiento que una estructura pudiera desarrollar ante un evento futuro. Cada curva ADI es altamente dependiente del registro sísmico que se esté utilizando. Debido a esto, el uso de un número mayor de registros sísmicos será necesario para poder cubrir todo el intervalo de respuestas que una estructura pudiera presentar.

Una de las observaciones principales al hacer un ADI con varios registros es la gran variabilidad que las curvas de respuesta presentan de registro a registro en una misma estructura. Esta variabilidad en la respuesta de un sistema estructural inelástico presenta retos para poder caracterizar o poder predecir la respuesta de ciertas estructuras en un futuro. Esta variabilidad también nos lleva a la necesidad de usar métodos estadísticos en las respuestas del

análisis con varios registros para poder resumir bien los resultados, en orden de poder ser utilizados como una predicción de la posible respuesta de la estructura en estudio.

### **2.3 Escalamiento lineal**

Existe una preocupación sobre la validez de los resultados de valores de daño obtenidos de registros que tuvieron que ser escalados, operación que es común tanto en investigación como en la práctica. Como se mencionó, la preocupación va más enfocada en pensar que registros débiles no pueden ser representativos de otros más fuertes. Una manera más concreta de ver la preocupación, es incertidumbre generada sobre si la mediana de la medida de daño obtenida de los registros que fueron escalados hasta poder producir un mismo límite de medida de intensidad puede estimar con el mismo resultado a la mediana de la medida de daño de una población de registros intensos sin escalar, que puedan introducir los mismos valores límite de medida de intensidad. Debido a las limitaciones de registros que puedan introducir en el sistema valores altos de medida de intensidad, y que estos valores altos de medida de intensidad sean los que más se necesiten para predecir los valores de daño que se pueden observar en una estructura, una vez más la preocupación que si la función de la mediana entre la medida de daño y la medida de intensidad obtenida con registros escalados estima con la misma exactitud a la de una obtenido con registros intensos sin escalar.

En la Figura 2.1 se presentan los Espectros de Fourier para sitios de roca en California de acuerdo con el modelo propuesto por Tothong y Cornell (2006) para dos diferentes valores de  $M_w$ . Se puede observar fácilmente el cambio de forma de los espectros, particularmente para frecuencias mayores a 0.1 Hz. Para hacer más visible esta diferencia de amplitudes, en la Figura 2.2 se muestran los cocientes de las amplitudes para los dos espectros de la Figura 2.1, donde una vez más, es evidente como el escalamiento de la amplitud de un sismo de magnitud mayor a otro, no es lineal, sino una función de la frecuencia.

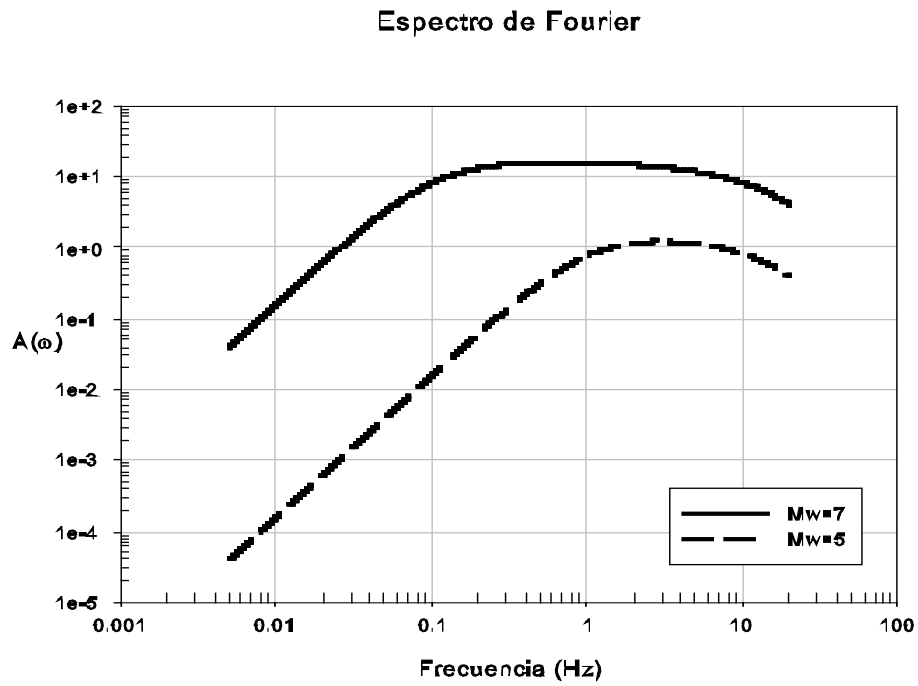
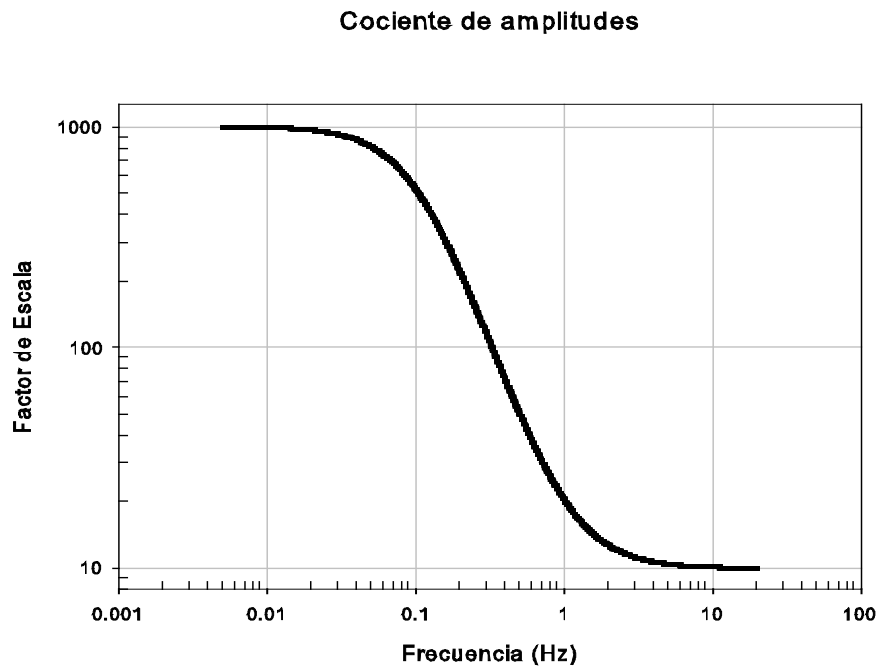
Figura 2.1 Espectros de Fourier para Magnitudes  $Mw=5$  y  $Mw=7$ .

Figura 2.2 Cociente de amplitudes entre los espectros de Fourier de la Figura 2.1.

### 3 BASE DE DATOS

#### 3.1 *Acelerogramas*

La base de datos de registros sísmicos que se usaron en esta tesis cumplen los parámetros necesarios para ser utilizados con los diferentes modelos de atenuación que se usan en este trabajo. Todos los acelerogramas seleccionados son de estaciones que se encuentran en el estado de California, en los Estados Unidos, ya que el modelo de atenuación inelástico de Tothong y Cornell (2006) está realizado tomando en cuenta parámetros y tipo de falla de esta zona, actualmente solo existe este modelo de atenuación para demandas inelásticas. Los registros se obtuvieron de la base de datos del Pacific Earthquake Engineering Research (PEER). Los parámetros revisados fueron acelerogramas en roca NEHRP tipo B y C, con una velocidad de corte ( $V_{S30}$ ) mayor a 760 m/s, de eventos principales (no réplicas), que fueran registrados en dos direcciones horizontales perpendiculares y una vertical, en estaciones en campo libre, y en estructuras de no más de un nivel. Se utilizó esta base de datos para ser congruentes en los cálculos hechos, ya que, usando los modelos de atenuación seleccionados para obtener la curva de peligro sísmico, se tiene una mayor base sismológica sobre los resultados obtenidos. En la Tabla 3.1 se muestran los 50 acelerogramas que se utilizaron en esta tesis para obtener las curvas ADI.

Tabla 3.1 Acelerogramas usados para los cálculos de Peligro Sísmico.

# Sismo	SISMO	AÑO	MAGNITUD	# Estación	Nombre Estación
1	Parkfield	1966	6.19	28	Cholame-Sandon Array 1
2	Parkfield	1966	6.19	30	Cholame-Sandon Array 5
3	Parkfield	1966	6.19	31	Cholame-Sandon Array 8
4	Parkfield	1966	6.19	33	Temblo pre-1969
5	San Fernando	1971	6.61	54	Borrego Springs Fire Station
6	San Fernando	1971	6.61	55	Buena Vista
7	San Fernando	1971	6.61	58	Cedar Springs Pumphouse
8	San Fernando	1971	6.61	62	Colton-50 Cal Edison
9	Coyote Lake	1979	5.74	147	Gilroy Array 2
10	Coyote Lake	1979	5.74	148	Gilroy Array 3
11	Coyote Lake	1979	5.74	149	Gilroy Array 4
12	Imperial Valley 06	1979	6.53	158	Aeropuerto Mexicali
13	Imperial Valley 06	1979	6.53	159	Agrarias
14	Imperial Valley 06	1979	6.53	160	Bonds Corner
15	Imperial Valley 06	1979	6.53	161	Brawley Airport
16	Coalinga 01	1983	6.36	342	Parkfield Zone 3
17	Morgan Hill	1984	6.19	457	Gilroy Array 3
18	Morgan Hill	1984	6.19	458	Gilroy Array 4
19	Morgan Hill	1984	6.19	459	Gilroy Array 6
20	Morgan Hill	1984	6.19	460	Gilroy Array 7
21	Palm Springs	1986	6.06	514	Cabazon
22	Palm Springs	1986	6.06	522	Indio
23	Palm Springs	1986	6.06	527	Morongo Valley
24	Chalfant Valley 01	1986	5.77	544	Bishop-LADWP South St.
25	Chalfant Valley 01	1986	5.77	546	Lake Crowley-Shehorn
26	Chalfant Valley 01	1986	5.77	547	Zack Brothers Ranch
27	Chalfant Valley 02	1986	6.19	549	Bishop-LADWP South St.
28	Chalfant Valley 02	1986	6.19	553	Long Valley Dam (Downstream)
29	Chalfant Valley 02	1986	6.19	554	Long Valley Dam (L Abut)
30	Superstition Hills 02	1987	6.54	721	El Centro Imp.
31	Loma Prieta	1989	6.93	741	Bran
32	Loma Prieta	1989	6.93	742	Bear Valley 1
33	Loma Prieta	1989	6.93	743	Bear Valley 10
34	Loma Prieta	1989	6.93	744	Bear Valley 12
35	Loma Prieta	1989	6.93	745	Bear Valley 14

Tabla 3.2 Acelerogramas usados para los cálculos de Peligro Sísmico (cont.)

# Sismo	SISMO	AÑO	MAGNITUD	# Estación	Nombre Estación
36	Cape Mendocino	1992	7.01	825	Cape Mendocino
37	Cape Mendocino	1992	7.01	826	Eureka
38	Cape Mendocino	1992	7.01	827	Fortuna
39	Cape Mendocino	1992	7.01	828	Petrolia
40	Landers	1992	7.28	832	Amboy
41	Landers	1992	7.28	833	Anaheim
42	Landers	1992	7.28	834	Arcadia Av.
43	Landers	1992	7.28	835	Arcadia Campus Dr.
44	Northridge 01	1994	6.69	942	Alhambra
45	Northridge 01	1994	6.69	945	Anaverde Valley
46	Northridge 01	1994	6.69	946	Antelope Buttes
47	Northridge 01	1994	6.69	949	Arleta
48	Northridge 01	1994	6.69	951	Bell Gardens
49	Hector Mine	1999	7.13	1761	Altadena
50	Hector Mine	1999	7.13	1762	Amboy

### 3.2 Cociente espectral

Uno de los parámetros más importantes que se verificaron fue que los registros fueran obtenidos sobre un suelo firme, para tomar o no los efectos de sitio que los modelos de atenuación deben incluir si los registros utilizados se encuentran sobre un suelo flexible. Para hacer una revisión de esto, se utilizó el método de los cocientes espectrales de Nakamura (1989), el cual permite darse una idea cualitativa de los efectos de amplificación de las ondas sísmicas que pueden presentarse en un sitio.

Este método consiste en establecer el cociente entre los espectros de amplitudes de Fourier de la aceleración del terreno para las componentes horizontal y vertical para un sitio determinado. Dicho cociente espectral es función principalmente de las características geotécnicas del sitio en estudio, mientras mayor sea el cociente espectral, mayor es la amplificación que se presenta en el sitio de estudio. Cabe mencionar que existen otros métodos

más sofisticados para cuantificar la amplificación de las ondas sísmicas en un sitio determinado. El objetivo de calcular los cocientes espectrales es revisar si las estaciones consideradas pudieran tener efectos de sitio significativos.

El cociente espectral utilizado tiene la ventaja de que es razonablemente independiente de la magnitud, distancia y profundidad focal del evento sísmico.

El espectro H/V fue calculado conforme a:

$$H/V(\omega) = \left| \frac{A(\omega)H}{A(\omega)V} \right|$$

Donde  $|A(\omega)H|$  es el espectro de amplitudes de Fourier de la media geométrica horizontal de la aceleración y  $|A(\omega)V|$  es el espectro de las amplitudes de Fourier de la componente vertical de la aceleración.

Dicho lo anterior se obtuvieron los cocientes espectrales de los 50 acelerogramas y se obtuvo la mediana de los logaritmos naturales de todos los cocientes espectrales. En la Figura 3.1 se puede observar que el cociente espectral es variable, con valores de la mediana menores que 3 en prácticamente todos los periodos, lo que nos dice que no hay efectos de sitio importantes a considerar.



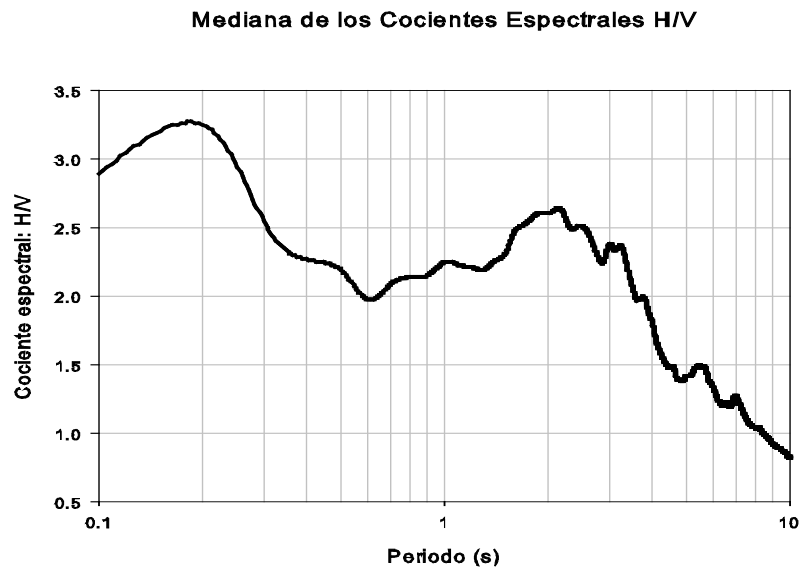


Figura 3.1 Coeficiente espectral promedio de los 50 acelerogramas seleccionados.

## 4 CALCULOS REALIZADOS

### 4.1 *Introducción*

Una serie de análisis se llevó a cabo haciendo uso de modelos de atenuación para obtener las respuestas de los SUGL. Aunque estos análisis basados en los modelos de atenuación también se puedan representar con el formato estándar de una curva ADI, este tipo de análisis no se considera un ADI. Estos análisis asociados a los modelos de atenuación serán señalados como los Análisis Dinámicos Basados en la Sismología (ADBS). Estos ADBS son muy limitados para ser una aplicación práctica debido al gran esfuerzo numérico que se necesita para desarrollarlos, pero en este caso se hicieron para poder estudiar las limitaciones y el intervalo de aplicación de un ADI estándar. Con este propósito, los resultados obtenidos con el ADBS se comparan con los obtenidos mediante el ADI.

Para evaluar de forma inicial la pertinencia de usar un ADI para caracterizar de manera probabilista las demandas sísmicas no lineales en sistemas estructurales se llevó a cabo un ADI multiregistro para establecer una curva mediana de capacidad dinámica y así poderla comparar con la curva de capacidad obtenida mediante los modelos de atenuación.

De la misma manera, y con el fin de apreciar en mayor detalle las implicaciones de usar los resultados obtenidos a partir de un ADI durante la estimación del peligro sísmico, se calculan tasas de excedencia para la ductilidad a partir de las curvas medianas obtenidas de los ADIs y sus correspondientes desviaciones estándar proyectadas en un espacio log normal. Además, se establecen curvas de peligro para los cálculos realizados mediante los modelos de atenuación. Esto permite comparar dos juegos de curvas de peligro sísmico: las obtenidas a partir de los ADI y las correspondientes al ADBS.

## ***4.2 Curva de capacidad mediante ADI***

Las curvas de ADI se generaron considerando un SUGL con 5% de amortiguamiento crítico, con un modelo histérico bilineal con una resistencia de post-fluencia del 5% de la rigidez inicial. El SUGL contempla una aceleración de fluencia ( $C_y$ ) de .05g. Las curvas ADI que se compararán en este trabajo tienen la ductilidad del sistema como la medida de daño a revisar y el factor de reducción de resistencia ( $R=S_a/C_y$ ) como medida de intensidad.

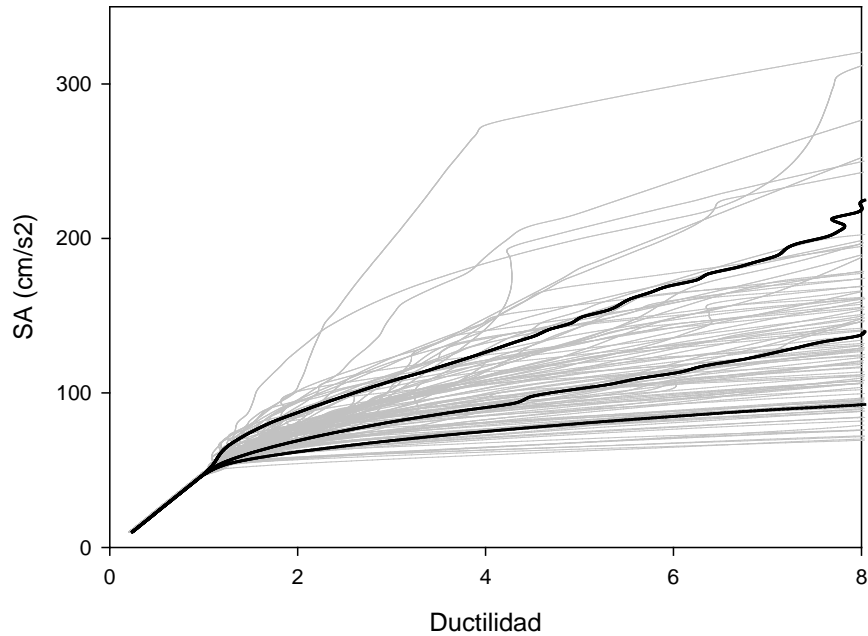
En la figura 4.1 se puede observar un ejemplo de un ADI multiregistro realizado para un oscilador un periodo de 0.1 segundo, para todos los casos, se buscó representar las curvas para que tuvieran escalamientos hasta generar aceleraciones de 1000 m/s<sup>2</sup> y se buscó limitar a no generar ductilidades mayores a 8, buscando resultados que aun sigan siendo congruentes con la práctica profesional. En la misma figura se representan la curva mediana, que es la que se comparara con la curva obtenida con un ADBS. De manera ilustrativa se indican también las curvas de la mediana más/menos una desviación estándar de los resultados de los 50 acelerogramas considerados, con esto se puede observar que los resultados tienen mucha variabilidad, por lo que su incertidumbre generada es importante mencionarla.

Con esta metodología se obtuvieron las curvas ADI para obtener su mediana para los periodos de 0.1s, 0.2s, 0.5s, 1.0s, 1.5s y 3.0s.

## ***4.3 Curva de capacidad mediante ADBS***

Con el fin de poder generar resultados comparables a las curvas de capacidad realizadas con el ADI, se seleccionó el modelo de atenuación elástico de Boore y Atkinson (BA-08) con el que se obtuvieron las demandas de aceleración ( $S_a$ ) tomando en consideración una distancia epicentral de 20km y una velocidad de onda de corte a los 30m de profundidad ( $V_{s30}$ ) de 700m/s para todos los casos. Como se mencionó ya anteriormente, el estudio busca evaluar el ADI tomando en cuenta el efecto de la no linealidad del oscilador, por lo que con la ayuda del modelo de

atenuación inelástica de Tothong y Cornell (2002), logramos obtener una predicción del desplazamiento inelástico esperado por el oscilador.

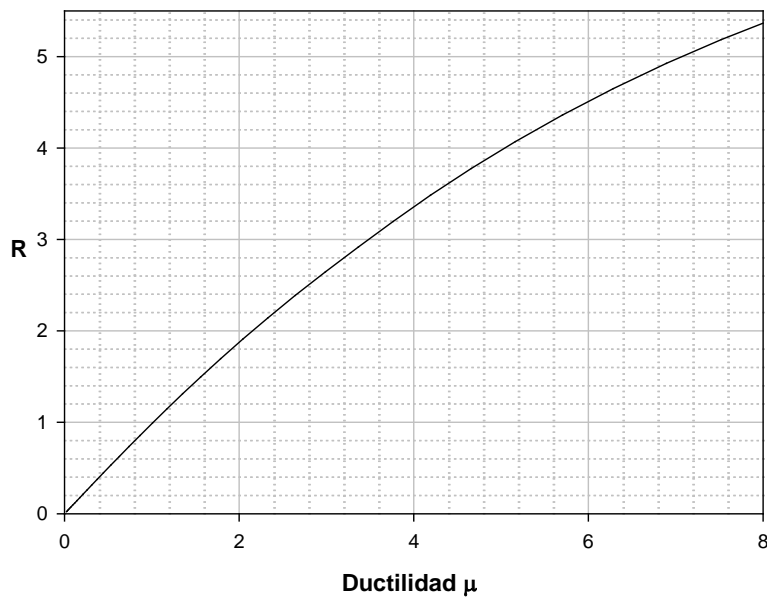


*Figura 4.1 ADI multiregistro para un oscilador de un grado de libertad con  $T=0.1s$  y  $Cy0.05g$ ., se presentan los resultados para los 50 registros seleccionados en gris, en negrita se resalta la mediana de los resultados, así como la misma con  $\pm$  una desviación estándar.*

Para el caso ilustrativo de la figura 4.2 se tomó un oscilador con un periodo de  $T=0.1s$  con una aceleración de fluencia de  $0.05g$ , buscando ser congruentes con los valores utilizados en las curvas ADI. Los pasos seguidos para obtener la curva se resumen a continuación:

1. Mediante el modelo de atenuación elástico de BA-08 se obtiene la aceleración esperada  $Sa(M_W, R_{CLD} = 20km)$  para una magnitud específica  $M_W$  y la distancia epicentral establecida de  $20km$ .
2. Conociendo el periodo del oscilador, se obtiene el desplazamiento elástico asociado a esa aceleración, dividiendo la aceleración entre la frecuencia del oscilador al cuadrado,  $Sde(M_W, R_{CLD} = 20km) = \frac{Sa(M_W, R_{CLD}=20km)}{\omega^2}$ .

3. Siguiendo los pasos del modelo de atención inelástico de Tothong y Cornell, y tomando como dato de entrada el desplazamiento elástico calculado conforme al paso anterior  $S_{de}(M)$ , se obtiene el desplazamiento inelástico del oscilador  $S_{di}(M_W, R_{CLD} = 20km) = S_{de}(M_W, R_{CLD} = 20km) * \frac{S_{di}}{S_{de}}(M_W, R_{CLD} = 20km)$ .
4. Para este paso ya se tienen los datos calculados, se graficaran los diferentes valores del factor de reducción de resistencia  $R = \frac{F_e}{F_y} = \frac{S_a(M_W, R_{CLD}=20km)}{c_y}$  contra la ductilidad máxima en términos del desplazamiento inelástico obtenido en el paso 3  $\mu = \frac{S_{di}(M_W, R_{CLD}=20km)}{d_y}$ . Para lograr obtener la gráfica, se repitieron estos pasos para un rango de Magnitudes de 4 a 8.5.



*Figura 4.2 Relacion R vs Ductilidad para un  $T=0.1s$  y un  $c_y=0.05g$ . considerando una no linealidad del oscilador y la metodología del ADBS.*

#### 4.4 Peligro sísmico mediante ADI

La mediana de las curvas ADI y la desviación estándar de su logaritmo se usaron para estimar las tasas de excedencia promedio de la ductilidad conforme a la siguiente ecuación:

$$v(\mu) = \int_0^{\infty} \frac{-dv(Sa)}{dSa} \frac{1}{v_0} P \left[ \mu > \frac{\mu_0}{Sa} = Sa \right] dSa \quad (4.1)$$

Donde  $v(\mu)$  es la tasa de excedencia de la ductilidad,  $\frac{-dv(Sa)}{dSa} \frac{1}{v_0}$  es la derivada de la tasa de excedencia de la aceleración espectral, obtenida mediante el modelo de atenuación elástico de BA-08 para magnitudes entre 6.5 y 7.6:

$$v(Sa) = \int_{6.5}^{7.6} f_m(M) P \left[ Sa > \frac{Sa_0}{M} = M \right] dM \quad (4.2)$$

Para la ecuación 4.2,  $P[Sa > Sa_0/M]$  es la probabilidad de excedencia de que la aceleración espectral obtenida con el modelo de atenuación elástico para una magnitud dada sea mayor a un valor de aceleración establecido. La probabilidad de excedencia se obtiene con:

$$P \left[ Sa > \frac{Sa_0}{M} = M \right] = 1 - \Phi(Sa) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(Sa_0 - Sa)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.3)$$

Donde  $\sigma$  es la desviación estándar arrojada por el modelo de atenuación de BA-08,  $Sa$  es la aceleración provocada por la magnitud en revisión y el modelo de atenuación seleccionado, y  $Sa_0$  es la aceleración para cual la distribución normal se quiere obtener.

Para el caso de la función de densidad de probabilidad se obtiene conforme a la ley de recurrencia de Gutenberg-Richter:

$$f(M) = \frac{\beta \exp[-\beta(M - M_0)]}{1 - \exp[-\beta(M_{max} - M_0)]} \quad (4.4)$$

Donde  $M_o$  es la magnitud mínima del intervalo a revisar,  $M_{\max}$  es la magnitud mayor,  $M$  es la magnitud a revisar y  $\beta = 2.303b$  donde "b" es un valor que describe la similitud relativa de grandes y pequeños sismos. (Kramer 1996).

Obteniendo la tasa elástica conforme a lo indicado en la ecuación 4.2 (ver figura 4.3), se obtiene la probabilidad de excedencia de que la ductilidad obtenida por el ADI para una  $S_a$  sea mayor a un valor de ductilidad establecido. Esta probabilidad de excedencia se obtiene con la misma fórmula 4.3 pero usando los valores arrojados por ADI, ya sean las aceleraciones como la desviación estándar:

$$P\left[\mu > \frac{\mu_o}{S_a} = S_a\right] = 1 - \Phi(\mu) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\mu_o - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.5)$$

La ventaja de la ecuación 4.1 es que el análisis de peligro sísmico para cada registro sísmico no es necesario para poder obtener la  $v(\mu_o)$ , debido a que esa información ya se incluye en  $v(SA)$ .

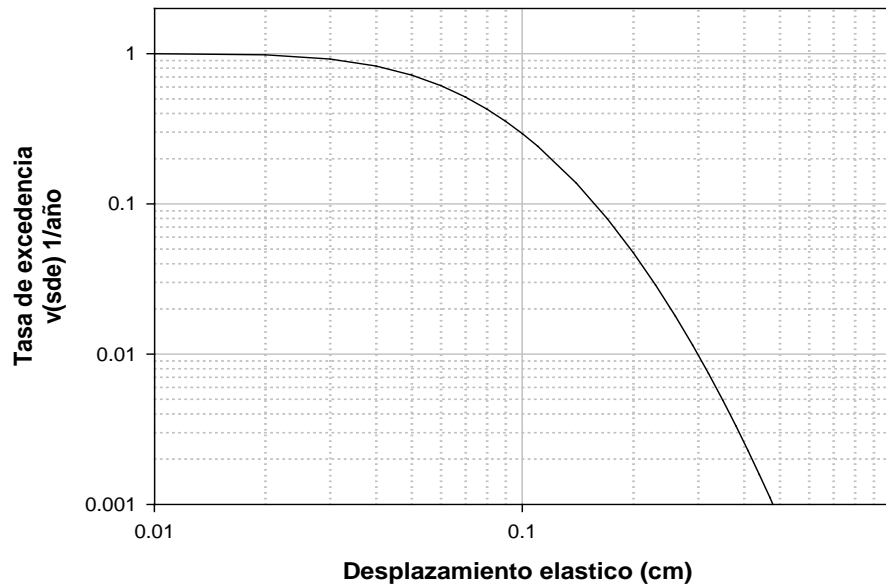


Figura 4.3 Tasa de excedencia de desplazamiento elástico mediante modelo de atenuación de Boore y Atkinson (2008) y un periodo  $T=0.1s$ , conforme a la ecuación 4.2.

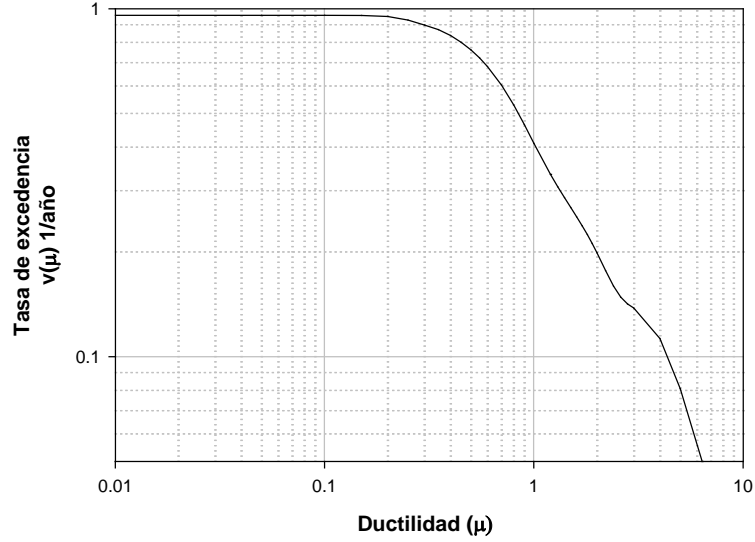


Figura 4.4 Tasa de excedencia de ductilidad usando la mediana del ADI para un periodo  $T=0.1s$ , conforme a la ecuación 4.1.

#### 4.5 Peligro sísmico mediante Análisis Dinámicos Basados en Sismología (ADBS)

Como lo realizado con los datos del ADI, para obtener las curvas de peligro con el ADBS, se obtuvieron los parámetros de demanda con el modelo de atenuación de Boore y Atkinson (2008) (BA-08). Se utilizó la ley de recurrencia de Gutenberg-Richter, para magnitudes entre 6.5 y 7.6. Para este caso que si se toma en cuenta la distancia entre el epicentro y el sitio a evaluar, se utilizó una distancia  $R_{rup}= 20km$ , la cual se usa en los modelos de atenuación.

La curva de peligro sísmico se obtiene con la siguiente ecuación:

$$v(\mu) = \int_{6.5}^{7.6} f_m(M) P[\mu > \mu_o/M] dM \quad (4.6)$$

Donde  $v(\mu)$  es la tasa de excedencia de la ductilidad,  $P[\mu > \mu_o/M]$  es la probabilidad de que la ductilidad  $\mu$  obtenida con el modelo de atenuación sea mayor a un valor  $\mu_o$  dado un valor de magnitud y  $f_m(M)$  es la función de densidad de probabilidad de Gutenberg-Richter.



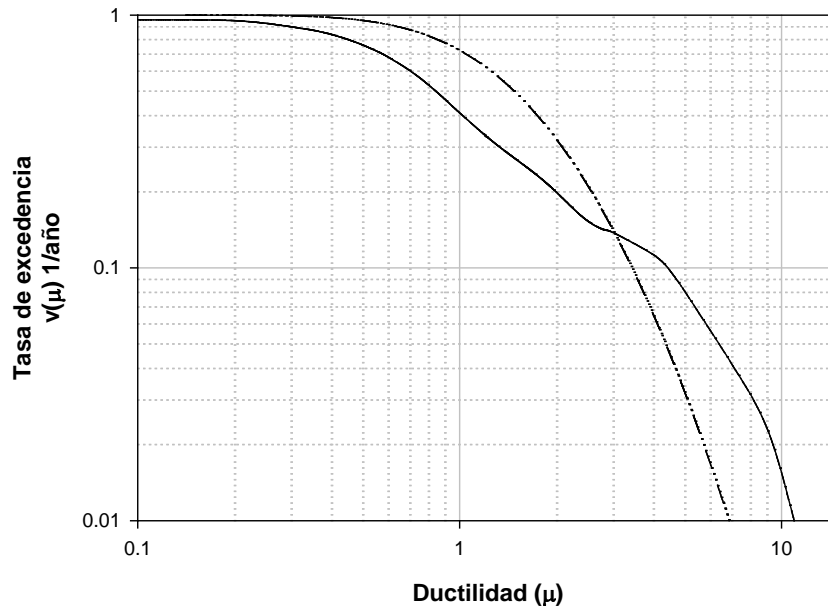
La probabilidad de excedencia se obtiene con:

$$P[\mu > \mu_o/M] = 1 - \Phi(\mu) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\mu_o - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.7)$$

Donde  $\sigma$  es la desviación estándar arrojada por el modelo de atenuación de BA-08,  $\mu$  es la ductilidad provocada por el desplazamiento inelástico (Tothong y Cornell) para un desplazamiento de fluencia dado ( $\mu = S_{di}/d_y$ ), y  $\mu_o$  es la ductilidad para cual la distribución normal se quiere obtener.

Para el caso de la función de densidad de probabilidad se obtiene utilizando por igual la fórmula 4.4.

En la figura 4.5 se comparan las curvas de tasa de excedencia conforme a la metodología comentada en este capítulo. En el siguiente capítulo se hará el análisis de resultados de diferentes SUGL con diferentes periodos.



*Figura 4.5 Comparativa de curvas de peligro sísmico obtenidas mediante un modelo de atenuación (BA-08) y al ADI, para un SUGL con  $T=0.1s$  y  $cy=0.05$*

#### ***4.6 Incertidumbre epistémica y el uso de diferentes modelos de atenuación.***

Todos los cálculos presentados al momento se generaron con el mismo modelo de atenuación (BA-08). Como este modelo existen muchos mas que arrojan resultados con diferencias para un mismo SUGL. Al no tener la certeza de cual trabajo realizado por diferentes autores puede realmente ser el que tiene la razón, y de la misma manera tomar en consideración que todos pudieran tener la razón; es importante tomar en cuenta la incertidumbre epistémica y así considerar la variabilidad y la incertidumbre existente en los resultados obtenidos por los diferentes análisis. Para tomar esto en cuenta, se utilizó un árbol lógico de decisión. Con esta metodología se permite utilizar modelos de atenuación alternativos, para los cuales se les da un factor de peso que asigna una probabilidad de que el modelo en consideración realmente es el correcto, la suma de los factores de peso de las diferentes opciones consideradas debe ser la unidad. Para esto, se usó lo propuesto por la actualización de los mapas de peligro sísmico de los Estados Unidos en 2008, el cual en su apartado de recomendaciones para el oeste del país (para ser congruentes con los acelerogramas utilizados en esta tesis) indica que para obtener el promedio geométrico entre los resultados obtenidos por los diferentes modelos de atenuación elástica que ellos mismos proponen, se hará obteniendo un producto pesado dando una importancia de un tercio a cada uno de ellos.

Dicho lo anterior, para todos los cálculos que se realizaron y estudiaron, se tomó en cuenta no solo el modelo de atenuación de Boore y Atkinson (2008), sino que también se hicieron los cálculos según el modelo de atenuación elástico de Chiou y Youngs (2008) y de Campbell y Bozorgnia (2008). En la Figura 4.6 se muestra un esquema del árbol lógico con los modelos de atenuación elásticos y los factores de peso tomados en cuenta para encontrar el desplazamiento elástico ponderado.

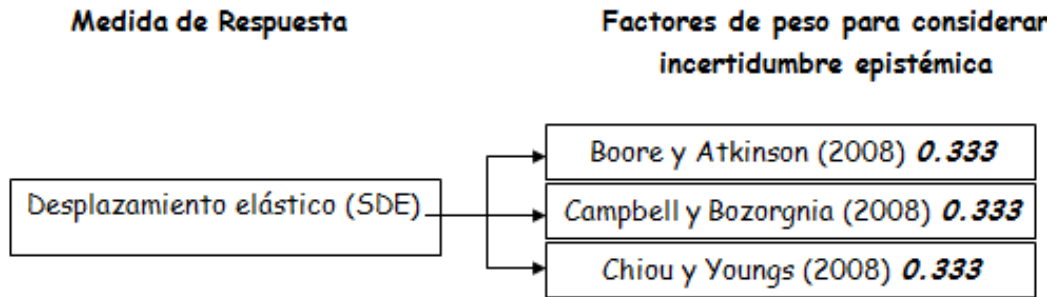


Figura 4.6 Factores de peso para obtener una medida de respuesta para obtener curva de peligro sísmico para el Oeste de los Estados Unidos según la Encuesta Geológica de los Estados Unidos (United States Geology Survey, USGS, 2008).

En la Figura 4.7 se muestran los resultados del cálculo del peligro sísmico utilizando los 3 modelos de atenuación elástico y su compuesto, que es el promedio pesado de los 3 resultados anteriores. Este compuesto es el que se usó para comparar con los resultados obtenidos por el ADI.

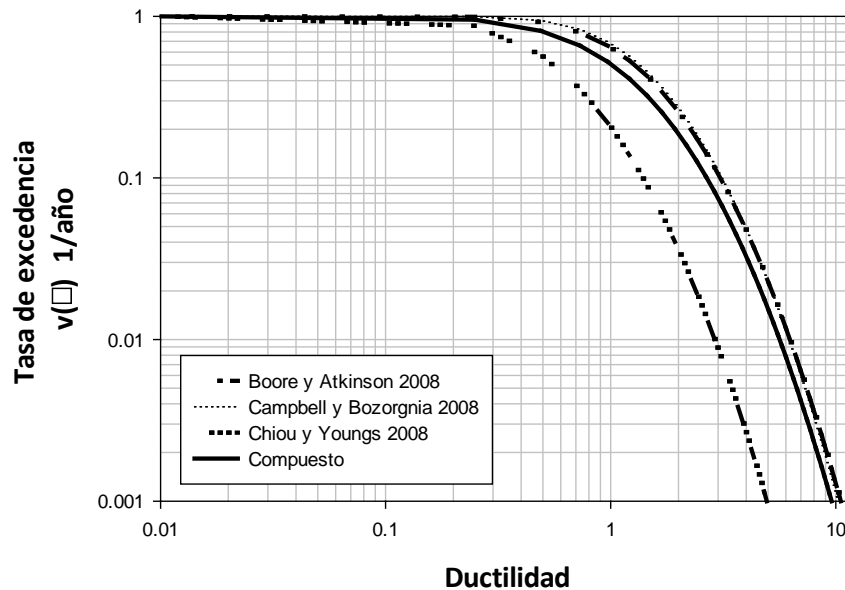


Figura 4.7 Tasa compuesta de peligro sísmico para tomar en cuenta la incertidumbre epistémica tomando los 3 modelos de atenuación elástica usados en la tesis. Ejemplo considerado para un  $T=2.0s$ .

#### 4.7 Definición de parámetro que limita la aplicabilidad del ADI

Conforme a lo discutido con anterioridad, el ADI contempla encadenar una serie de análisis dinámicos donde cada registro se escala de forma secuencial al multiplicar por factores constantes, los cuales se definen con diversos criterios. Con el fin de determinar el valor máximo de intensidad para el cual el ADI ofrece caracterizaciones razonables de las demandas no lineales en los SUGL, se define un parámetro denominado  $R_{LIM}$ .

Para la definición de este parámetro se revisaron diversos criterios que se fundamentaban en la relación de los valores medios calculados para cada método de análisis, la relación de sus covariancias, parámetros que corresponden al área de empalme entre las dos funciones de densidad de probabilidad que se formarían con las demandas obtenidas por medio del ADI y el ADBS, las cuales consideran como hipótesis fundamental que el valor de las desviaciones estándar obtenidas del ADBS y el ADI son muy similares (Quiroz 2013).

Se verificó la hipótesis de la similitud entre los valores de desviación estándar estimadas para el ADBS y el ADI, y se observó que los valores de  $R_{LIM}$  estimados con los distintos criterios no difieren en más del 5% respecto de considerar un criterio simple y directo como lo es la estimación directa de la diferencia entre los valores de la mediana de ductilidad de ambos análisis, la cual definimos como  $|b|$ .

Se decidió tomar entonces el valor  $R_{LIM}$  al asociado cuando  $|b|$  llega a un valor de 0.1:

$$|b| = \ln(\mu[MA]) - \ln(\mu[ADI]) \text{ para los diferentes valores de } R.$$

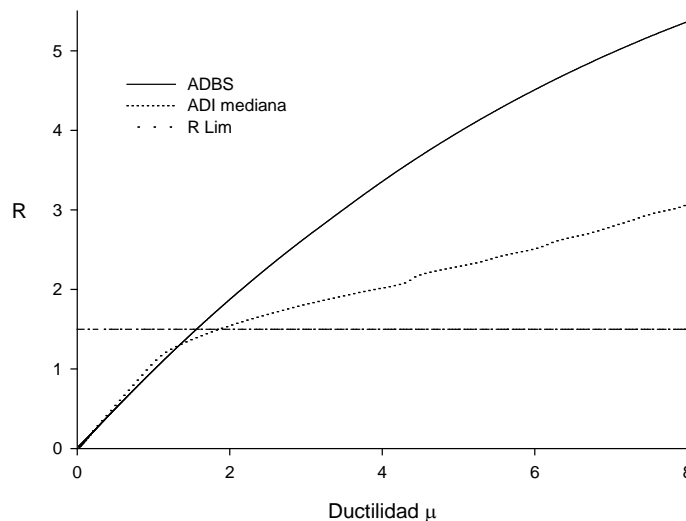


Figura 4.8 Comparativa entre curva de capacidad obtenida mediante ADI y ADBS, donde se introduce el valor  $R_{LIM}=1.46$ , para un periodo de  $T=0.1s$ .

## **5 ANALISIS DE RESULTADOS**

## 6 CONCLUSIONES

En orden de encontrar las consecuencias del escalamiento lineal de acelerogramas dentro del contexto del Análisis Dinámico Incremental para un Sistema de un Grado de Libertad, se analizaron estos sistemas dentro de un marco sismológico con ayuda de modelos de atenuación elásticos (BA-08, CB-08 Y CY-08) e inelástico (Thothong y Cornell, 2006) para encontrar la exactitud de el ADI para estimar las tasas de excedencia de sistemas inelásticos. Se considero la condición para todos los acelerogramas que estuvieran en suelo firme para que la interacción suelo estructura no afectara los resultados obtenidos, limitando los parámetros que puedan afectar los resultados obtenidos.

Con este trabajo se puede observar que para un SUGL con periodos cortos menores o igual a 1.0s el ADI lleva mas rápido al sistema a fluir, teniendo valores de ductilidad conservadores, ampliándose esta diferencia a partir de un periodo de retorno de 10 años hacia uno mayor. La razón por la que el efecto del escalamiento lineal de los acelerogramas es tan importante para el rango de periodos de oscilación cortos dentro del marco del ADI se puede atribuir al hecho de que estos sistemas son más sensibles a cambios pequeños de las propiedades estructurales y a los contenidos energéticos de los registros sísmicos que el escalamiento lineal no contempla correctamente.

Para sistemas con Periodos de oscilación mayores a 1.0s se observo que para tasa de excedencia de 0.01 o mayores, el ADI subestima los valores de ductilidad, aunque para tasas de excedencia menores, se invierten los resultados, teniendo valores conservadores al crecer el periodo de retorno. Estas diferencias son mucho menores a las mostradas para SUGL con periodos de oscilación cortos.

El trabajo mostrado contribuye al cuerpo de conocimiento disponible en términos de la aplicabilidad del escalamiento lineal de acelerogramas dentro del contexto del ADI. Es importante notar que aunque las conclusiones aquí dadas son limitadas a los modelos de

atenuación usados, los acelerogramas seleccionados y las características y/o propiedades de los sistemas seleccionados descritos anteriormente, los resultados sugieren nociones a ser consideradas en el uso del ADI. Es importante considerar los valores límite de R obtenidos, ya que estos proveen una caracterización numérica de la limitante del escalamiento lineal de los registros sísmicos.

## 7 REFERENCIAS

- Baker, J. W. and Cornell, C. A., (2005) "A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon", *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 34, 1193-1217, DOI: 10.1002/eqe.474.
- Beresnev, I.A. and Atkinson, G.A. (1997) "Modeling finite-fault radiation from  $\Xi$  spectrum", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87, 67-84.
- Boore, D. M., (1983) "Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73, No. 6, 1865–1894.
- Boore D. and Atkinson G. (2008). "Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01s and 10s". *Earthquake Spectra*, Volume 24, No. 1, pages 99–138, February 2008; © 2008, Earthquake Engineering Research Institute
- Campbell K. and Bozorgnia Y. "NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s" *Earthquake Spectra*, Volume 24, No. 1, pages 139–171, February 2008; © 2008, Earthquake Engineering Research Institute.
- Chiou B. and Youngs R. "An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra" *Earthquake Spectra*, Volume 24, No. 1, pages 173–215, February 2008; © 2008, Earthquake Engineering Research Institute.
- "Documentation for the 2008 Update of the United States National Seismic Hazard Maps" *USGS Open-File Report 2008-1128*.
- Iervolino, I. and Cornell, C.A. (2005) "Record selection for nonlinear seismic analysis of structures", *Earthquake Spectra*, 21(3), 685–713.



- Joyner, W.B., y Boore, D.M. (1986) "On simulation large earthquakes by Green's functions addition of smaller earthquakes", *Earthquake Source Mechanics*, (Maurice Ewing series 6), S. Das, J. Boatwright, and C. H. Sholtz (Editors), American Geophysical Monographs, No. 37, 269-274, Washington, D.C.
- Kramer, Steven (1996). "Geotechnical Earthquake Engineering". USA Prentice Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics.
- Kohrs–Sansorny C., Courboux, F., Bour, M. y Deschamps A., (2005) "A two – stage method for ground simulation using stochastic summation of small earthquakes", *Bulletin of the Seismological Society of America*, No. 95, 1387–1400.
- Nakamura Y. 1989. "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtemor on the ground surface" *QR of RTRI* 30:25-33.
- Ordaz, M. Arboleda, J. and Singh S.K., (1995), "A scheme of random summation for an empirical Green's function to estimate ground motions from future large earthquakes", *Bulletin of the Seismological Society of America*, No. 85(6), 1635-1647.
- Quiroz-Ramírez A., Arroyo D., Terán A. and Ordaz M. (2010). "Evaluation of the Intensity Measure approach in Performance Earthquake Engineering through the use of Simulated Ground-Motions"
- Quiroz-Ramírez A., (2013). "Un enfoque sismológico para el Análisis Dinámico Incremental (ADI): Repercusiones sobre el peligro sísmico"
- Somerville, P., Sen, M. y Cohee, B., (1991) "Simulations of strong ground motions recorded during the 1985 Michoacan, México and Valparaiso Chile earthquakes", *Bulletin of the Seismological Society of America*, No.81, 1–27.
- Tothong, P. y Cornell, C.A., (2006a) "An empirical ground motion attenuation relation for inelastic spectral displacement", *Bulletin of the Seismological Society of America*, No. 96, 2146-2164.

- Tothong, P. y Cornell, C.A., (2006b) *“Probabilistic seismic demand analysis using advanced ground motion intensity measures, attenuation relationships and near-fault effects”*, Report PEER 2006/11, Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Tothong P. and Cornell A. (2006). *“An Empirical Ground-Motion Attenuation Relation for Inelastic Spectral Displacement”*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 6, pp. 2146-2164.
- Vamvatsikos D. and Cornell A. (2002). *“Incremental Dynamics Analysis”*. Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, CA. USA.